

論文の内容の要旨

論文題目	双腕アームロボットによる布被覆作業に関する研究
学位 申請者	林 直宏

近年、工場等ではロボット化がさかんに行われている。一方で、ロボット化できない作業もいまだ数多く存在している。それらは、人にしか行えないような巧みで複雑な作業、あるいはロボットより人の方が効率的にできてしまうような作業である。そのような作業の一つとして布を扱う作業が挙げられる。布を扱う作業の中には、布単体を操作するだけでなく、布と物体を一緒に取り扱う必要がある作業が多く存在しており、典型的な例として被覆作業があげられる。しかし、被覆作業をロボットに実行させるための有効な作業モデルは確立されていない。

そこで、本研究ではロボットによる被覆作業を実現するための枠組みの提案を行う。被覆作業をロボット化する上で問題となるのは、汎用的な被覆モデルとして、物体と布との関係や被覆作業の手順をどのように記述すべきかということである。次に、そのような被覆のための作業記述を、ロボットにどのように入力（教示）するかが問題となる。そこでは煩雑な指示方法ではなく、実空間上で人間が考えている被覆作業を直感的にロボットに指示できるのが望ましい。最後に、指示された作業記述からロボットの動きを適切に生成する方法が必要となる。ロボットが被覆作業を達成するためには、単純に手先軌道を生成するのではなく、物体やロボット自身との干渉を回避しながら状況に合わせた適切な動作が生成される必要がある。以上を踏まえて、本研究ではロボットによる被覆作業を実現するために以下の課題に取り組んだ。

- ・布と物体の関係を適切に表す記述方法の提案
- ・直感的な被覆手順の指示方法の提案
- ・ロボットの動作軌道の生成方法の提案

布と物体の関係を適切に表す記述方法として、コンピュータグラフィクス分野で提案されている目標線という記述方法を元にして、ロボットのための三階層からなる被覆作業のモデルを提案した。その中で基本となるのは目標線によ

る被覆状態の記述方法である。これは、物体のどこがどのように布で包まれるかという被覆にとって本質的な情報が自然に表されるという利点を持つ。それに加え、完成時の布と物体の位置関係だけでなく、どのような手順で被覆を行うかという情報も自然に表現可能であり、その点でもロボットによる作業のための記述として適している。また、凹凸が存在するような形状の物体に対しても適切に被覆を行うためにはその凹凸を適切に処理して作業を記述する必要があるが、本研究では物体の埋めるべき凹部と埋めるべきでない凹部を区別して適切な目標線指示を行うための「局所凸」という概念を導入し、物体形状の局所凸化の手法を提案した。

次に、直感的な被覆手順の指示方法として、人が大まかに被覆方法を（人に対して）伝える状況を参考にして、物体と布のどこを重ね合わせるかという被覆の意図を直感的に入力する方法を提案した。ここでは、作業指示を行う手先の正確な三次元の軌跡ではなく、手の軌跡とその軌跡が通過していく物体表面の関係に注目した。そして、距離センサとモーションキャプチャを組合せた教示デバイスを開発し、被覆の意図を抽出してそこから目標線に基づく作業記述を生成する手法を提案した。また技術的な課題への対策として、指示中の手振れの影響を小さくするための目標線逆走防止処理手法やスムージングと間引き処理を合わせた補正処理手法の実装も行った。

最後に、ロボットの動作軌道の生成方法として、目標線と把持点から布の動きを表す手先経路を生成する方法と、その手先経路を実行するためのロボット動作の生成方法を提案した。実際のロボットを動かすためには、完成状態における布と物体の位置関係を考慮するだけでなく、ロボットの可動域や物体との干渉を考慮する必要がある。そして、必要であれば右手と左手を用いた布の持ち替えなども行わなければならない。本研究では、目標線に基づく記述から、自動的に手先経路および動作指令を生成する方法を提案した。ここでは、各操作の布への重力の影響や動作ステップ数、ロボットと布の位置関係を考慮した動作の確実性に基づいて動作遷移グラフが構成され、それを用いて最適な持ち替えや持ち直し操作の組み合わせが計画される。

以上、本研究では、物体を布で包むという被覆作業に関してロボット化のための枠組みを提案した。具体的には、これらを作業の記述、ロボットへの指示、ロボット動作の生成に分けてそれぞれに対して新たな手法を提案した。さらに、各課題に対する提案方法を統合し、一連の被覆作業システムとして実装した。これによって、人による大まかな被覆作業の指示から適切なロボット動作を生成できるようになり、ロボットによる被覆作業が実現した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名 林 直宏

審査委員主査 工藤 俊亮

委員 末廣 尚士

委員 阪口 豊

委員 栗原 聡

委員 野嶋 琢也

本論文はロボットによる柔軟物操作に関するものであり、中でも布で物体を包む作業（被覆作業）に注目し、ロボットによる被覆作業実現のための枠組みを提案している。

第1章では、背景と研究目的を述べている。近年、工場等ではロボット化がさかんに行われている一方で、ロボット化できない作業もいまだ数多く存在している。そのような作業の一つとして布を扱う作業、中でも布と物体と一緒に取り扱う必要がある被覆作業に注目し、本研究ではロボットによる被覆作業を実現するための枠組みを提案することを目的としている。その上で、関連研究の調査等を通して解決すべき課題を具体的に検討している。被覆作業をロボット化する上でまず問題となるのは、汎用的な被覆モデルとして、物体と布との関係や被覆作業の手順をどのように記述すべきかということである。次に、そのような作業記述をロボットにどのように入力（教示）するかが問題となる。そこでは煩雑な指示方法ではなく、実空間上で人間が考えている被覆作業を直感的にロボットに指示できるのが望ましい。最後に、指示された作業記述からロボットの動きを適切に生成する方法が必要となる。ロボットが被覆作業を達成するためには、単純に手先軌道を生成するのではなく、物体やロボット自身との干渉を回避しながら状況に合わせた適切な動作が生成される必要がある。以上を踏まえて、本研究で取り組む課題が以下のように整理されている。

- ・ 布と物体の関係を適切に表す記述方法の提案
- ・ 直感的な被覆手順の指示方法の提案
- ・ ロボットの動作軌道の生成方法の提案

第2章では、被覆作業を記述する手法について述べている。ここでは、布と物体の関係を適切に表す記述方法として、コンピュータグラフィックス分野で提案されている目標線という記述方法を元にして、ロボットのための三階層からなる被

覆作業のモデルを提案している．その中で基本となるのは目標線による被覆状態の記述方法である．これは，物体のどこがどのように布で包まれるかという被覆にとって本質的な情報が自然に表されるという利点を持つ．それに加え，完成時の布と物体の位置関係だけでなく，どのような手順で被覆を行うかという情報も自然に表現可能であり，その点でもロボットによる作業のための記述として適している．また，凹凸が存在するような形状の物体に対しても適切に被覆を行うためにはその凹凸を適切に処理して作業を記述する必要があるが，本研究では物体の埋めるべき凹部と埋めるべきでない凹部を区別して適切な目標線指示を行うための「局所凸」という概念を導入し，物体形状の局所凸化の手法を提案している．

第3章では，ロボットに被覆手順を指示するための直感的な手法について述べている．人が人に対して大まかに被覆方法を伝えるという状況を参考にして，物体と布のどこが重ね合わされるかという被覆の意図を直感的に入力する方法が提案されている．ここでは，作業指示を行う手先の正確な三次元の軌跡ではなく，手の軌跡とその軌跡が通過していく物体表面の関係が注目される．そして，距離センサとモーションキャプチャを組合せた教示デバイスを開発し，被覆の意図を抽出してそこから目標線に基づく作業記述を生成する手法を提案している．また技術的な課題への対策として，指示中の手振れの影響を小さくするための目標線逆走防止処理手法やスムージングと間引き処理を合わせた補正処理手法の実装も行っている．

第4章では，ロボットの動作軌道の生成方法について述べている．ロボットの軌道は2段階で生成される．まず，目標線と把持点から布の動きを表す手先経路が生成される．その後，手先経路を実行するためのロボット動作が生成される．実際のロボットを動かすためには，完成状態における布と物体の位置関係を考慮するだけでなく，ロボットの可動域や物体との干渉を考慮する必要がある．そして，必要であれば右手と左手を用いた布の持ち替えなども行わなければならない．本研究では，目標線に基づく記述から，自動的に手先経路および動作指令を生成する方法を提案している．ここでは，各操作の布への重力の影響や動作ステップ数，ロボットと布の位置関係を考慮した動作の確実性に基づいて動作遷移グラフが構成され，それを用いて最適な持ち替えや持ち直し操作の組み合わせが計画される．

第5章では，本研究の成果が総括されている．

以上のように，本研究では被覆作業をロボット化するための枠組みを提案している．具体的には，課題を作業の記述・ロボットへの指示・ロボット動作の生成に分けてそれぞれに対して新たな手法を提案した上で，各課題に対する提案方法を統合し一連の被覆作業システムとして実装した．ロボットによる柔軟物操作の研究において，この結果の寄与は大きいといえる．よって，本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと認められる．